第 40 卷 第 2 期
2023 年 4 月
应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 40 No. 2
Apr. 2023

文章编号:1000-4939(2023)02-0450-09

含分叉结构输水管道泄漏瞬态特性数值模拟

张巧玲[1],吴峰[1],杨振东[1],曹佳豪[2],李国栋[1],严悦[1]

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安;
2. 浙江复星水利勘测设计有限公司,325006 温州)

摘 要:在输水工程中,由于地形、地质等因素的限制,分叉型结构管道得以广泛推广和应用,分叉结构输水管道泄漏是国内外学者非常关注的一个重要问题,而瞬变流法是目前高效、精确且快速的泄漏检测方法之一。基于此,本研究构建了含分叉结构输水管道的瞬变流模型,探究了影响阀门末端压力变化的因素。结果表明,压力曲线的差异性随分叉管长度的增加而增大;压力曲线的衰减速率随阀门关闭时间的增加而变慢;泄漏量对压力曲线变化周期影响不大,但随着泄漏量增大,压力曲线的面积积分变小;泄漏位置不同,压力曲线在幅值处的形状不同,当泄漏位置位于管道上半段时,曲线在幅值处会凸起,当位于管道下半段时,曲线在幅值处会出现凹陷的趋势。

关键词:瞬变流;数值模拟;分叉管道;泄漏检测

中图分类号:TV134.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.023

Numerical simulation of leakage transient characteristics of water pipeline containing bifurcation structure

ZHANG Qiaoling[1], WU Feng[1], YANG Zhendong[1], CAO Jiahao[2], LI Guodong[1], YAN Yue[1]

(1. Xi'an University of Technology, Northwest Arid Area Ecological Water Conservancy National Key Laboratory, 710048 Xi'an, China; 2. Zhejiang Fuxing Hydraulic Survey Design Co. Ltd., 325006 Wenzhou, China)

Abstract: In water transportation projects, due to the constraints of topography and geology, bifurcated pipelines have been widely promoted and applied. The leakage of bifurcated water pipelines is an important issue of great concern to scholars at home and abroad, and the transient flow method is one of the most efficient, accurate and fast leak detection methods at present. Based on this, this paper constructs a transient flow model of water pipeline with bifurcation structure, and explores the influence of different factors on the pressure change at the end of the valve. The factors affecting the pressure change at the end of the valve were investigated. The results show that the difference of pressure curve increases with the increase of the length of bifurcation pipe, the attenuation rate of pressure curve decreases with the increase of valve closing time, and the leakage has little influence on the variation period of pressure curve. The leakage position is different, the shape of the pressure curve at the amplitude is different. When the leakage position is in

收稿日期:2021-03-20 **修回日期:**2021-07-01

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 51906201);陕西省自然科学基金资助项目(No. 2020JM-459);陕西省教育厅协同创新中心资助项目(No. 20JY044)

通信作者:杨振东。E-mail:yangzhendong@xaut.edu.cn

引用格式:张巧玲,吴峰,杨振东,等. 含分叉结构输水管道泄漏瞬态特性数值模拟[J]. 应用力学学报,2023,40(2):450-458.
ZHANG Qiaoling, WU Feng, YANG Zhendong, et al. Numerical simulation of leakage transient characteristics of water pipeline containing bifurcation structure[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(2):450-458.

the upper half of the pipeline, the curve will be convex at the amplitude, and when it is in the lower half of the pipeline, the curve will be concave at the amplitude trend.

Key words: transient flow; numerical simulation; bifurcated pipeline; leak detection

随着社会经济的快速发展,人们对水资源的需求不断增加,由于长距离输水系统常常经过复杂地形且支路多,实际工程中广泛应用分叉结构管道。然而,由于腐蚀老化、人为破坏等原因而导致管道泄漏问题越来越严重,威胁了输水系统的安全运行[1]。管道泄漏不仅会造成严重的经济损失,也在一定程度上对环境造成污染[2],甚至会对人民的生命健康造成威胁,因此,迫切需要提出一种精确高效的管道泄漏检测方法。瞬变流法是检测管道泄漏的有效手段之一[3],其主要原理是:在管内施加一个激励信号来产生水击波,当该水击波经过泄漏点时会发生衰减和畸变,由其变化规律及特征可以判断泄漏位置和泄漏量。

目前,针对输水管道泄漏问题,国内外学者进行了一系列的研究。陈玉涛等[4]构建了一维数学模型,分析了影响分叉管道压力变化的因素。周知进等[5]研究了不同角度下流体冲击对管壁应力的影响。蒋明等[6]发现应用特征法求解耦合瞬变流问题会造成较大的误差,提出了一种求解管道耦合瞬变模型的计算格式,并通过实验与仿真证实该方法的可行性与有效性。赵卓等[7]采用断电停泵方式引入瞬变流,分析空气阀与空气罐结合对水锤的防护效果,发现其大大降低了管道的水锤压力。陈兵等[8]利用 OLGA 软件模拟了泄漏过程中压力变化特征,并分析了影响因素,为管道输送的安全设计与运行提出了合理建议。白莉等[9]基于瞬变流理论,用非线性动态系统的状态空间模型来替代水动力学模型,用滤波来估计预测的水力要素,泄漏定位的精度得以提高。蔡正敏等[10]结合序贯概率比检验法与管道泄漏故障诊断,提出了泄漏识别因子这一概念,管道泄漏检测的精度得以提升,引入了瞬变流动,并建立了瞬变流方程,对不同泄漏位置处的瞬变特性进行了对比分析。杨开林、郭新蕾等学者[11-14]针对长距离输水管线构建了水击频域数学模型,利用快速关闭阀门以及瞬变流发生器的方式引入瞬变流,泄漏位置由瞬变信号的尖点来确定,并利用遗传算法求解了反问题,对实际工程中泄漏检测的精准定位提供了可能。杨镇榜等[15]提出了一种基于瞬变流理论的输油管道泄漏检测方法,以连续压力波为输入信号,以管道出口压力信号为输出信号。李毅佳等[16]通过瞬变流泄漏仿真模型来模拟压力波形,并建成了模式识别库,管道是否发生泄漏由负压波识别法来判断。陈潜等[17]建立了输气管道瞬变流模型,分析了发生泄漏时管道沿程置压力、流量随时间的变化特征,并确定了泄漏位置。输水过程中由于管道泄漏、阀门关闭等引起瞬态流动时,流动信号在噪声、振动等的干扰下,容易引发错误报警,因此,郑杰等[18-19]采用信号采集方法设计了一种泄漏检测装置,为精确检测瞬变特性提供了一定的理论指导意义。康宪芝等[20]采用 Flowmaster 软件对长距离输水管道进行了数值仿真计算,谐波分量根据压力信号的时频分析来提取,并根据其衰减值定位泄漏位置。孙良等[21]提出了一种采用特征线法进行泄漏检测与定位仿真模拟的瞬变流模型。胡靖[22]通过用反问题来分析瞬变流模型的方式,研究分析了长距离输水管道的泄漏。

DUAN 等[23]综述性介绍了目前瞬变流理论的研究进展,并合理建议了该领域的未来主要工作。吴猛猛等[24]基于瞬变流理论,建立了典型的管道泄漏系统模型,模拟分析了泄漏发生时管道瞬态压力波的影响因素。HE 等[25]根据瞬变压力的大小,建立了 3 种基于瞬变流压力大小的泄漏量计算模型,分析了影响泄漏量值的临界参数,并通过实验验证了模型正确性。CHEN 等[26]构建了一种计算管道瞬态泄漏量模型,求解得到最小可检测泄漏孔的位置,并详细分析了泄漏量的敏感性。WANG 等[27]通过多次实验发现噪声影响管道泄漏检测的精度,提出了滤除噪声信号干扰的方法。俞逸飞等[28]通过数值仿真软件 Flowmaster 对管道泄漏位置、泄漏点大小、直径变化等进行了仿真,并分析了不同因素对测量精度的影响。LEE 等[29-31]建立了“直管-水库”模型,通过模型试验研究了因阀门关闭引发的瞬变流特性,并通过逆瞬态分析法确定了泄漏发生的位置以及泄漏量。

至今,已有一些国内外学者对管道泄漏时的瞬态特性进行了研究,但是关于复杂分叉输水管道泄漏的研究还较少。基于此,本研究针对分叉结构输水管道,构建了瞬变流模型,模拟分析了其泄漏过程

中的瞬态特性变化特征,分析了分叉管长度、阀门关闭时间、泄漏量、泄漏位置等因素对管内流体瞬变过程的影响规律,研究成果可为长距离输水管道的安全运行提供一定的理论指导。

1 计算模型

1.1 模型建立

分叉结构输水管道泄漏示意图如图1所示,由上游水库、直管、分叉管、下游水库、阀门等组成。假定管道为一均质直管,管道平铺,不考虑倾斜角 α 的影响,上游水库的水位 $H=25$ m,保持恒定不变,上游直管道的长度 $L=1\ 000$ m,下游分叉管道的长度 $L_1=L_2=500$ m,管道直径 $D=0.2$ m,流量 $Q_0=0.02\ \mathrm{m^3/s}$,网格特征长度 $\Delta x=10$ m,时间步长 $\Delta t=0.01$ s。泄漏量及泄漏位置根据不同工况进行选择,阀门采取线性关闭方式。

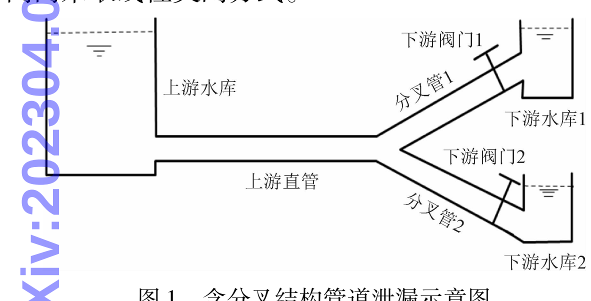


图1 含分叉结构管道泄漏示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pipeline leakage with bifurcated structure

1.2 控制方程

联立连续方程和运动方程,构建了输水管道瞬变流数学模型,即

$$L_1=\frac{\partial H}{\partial t}+v\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{a^2}{g}\frac{\partial v}{\partial x}=0,$$

$$L_2=\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{fv|v|}{2gD}+\frac{k}{g}\left(\frac{\partial v}{\partial t}-a\frac{\partial v}{\partial x}\right)=0 \tag{1}$$

其中:k 为 Brunone 阻力系数;f 为达西摩阻系数;v 为管内流体平均流速;a 为水击波速;α 为管道倾斜角;H 为压力;g 为重力加速度;x 为管道位置;t 为时间。

1.3 特征线方程

由于流体流速 v 远远小于水击波速 a,因此模型中 v 与 H 的对流项忽略不计,采用特征线法将式(1)转换为常微分方程,得到了正负特征线方程,即

$$C^+:\mathrm{d}H+\frac{a}{gA}\mathrm{d}Q+\frac{fa}{(1+k)D}\frac{Q|Q|}{2gA^2}\mathrm{d}t=0$$

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\frac{a}{1+k}$$

$$C^-:\mathrm{d}H-\frac{a(1+k)}{gA}\mathrm{d}Q-\frac{fa}{D}\frac{Q|Q|}{2gA^2}\mathrm{d}t=0$$

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-a \tag{2}$$

将 $B=\dfrac{a}{gA}$,$R=\dfrac{faDt}{2gA^2D}$,$Q|Q|==Q_P|Q_R|$,$C_0=1+k$,带入式(2),并沿着图2中的两条特征线进行积分,得到的有限差分方程如下

$$C^+:H_P-H_R+B(Q_P-Q_R)+R/C_0Q_P|Q_R|=0,$$

$$C^-:H_P-H_B-BC_0(Q_P-Q_B)-RQ_P|Q_B|=0 \tag{3}$$

特征线网格节点处示意图如图2所示。

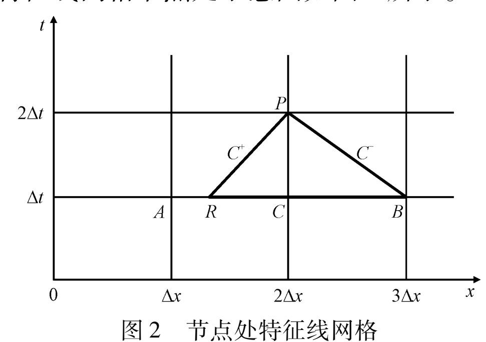


图2 节点处特征线网格

Fig. 2 Feature line mesh at node

将整个输水管道平均分成为 N 段,每段的长度为 Δx,时间步长为 Δt,可得到特征线插值网格图,如图3所示。

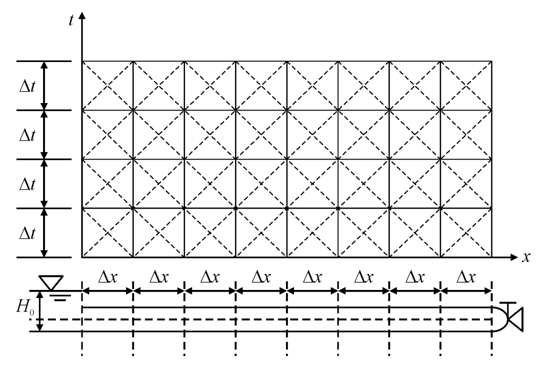


图3 管道特征线插值方式网格图

Fig. 3 Grid diagram of pipeline characteristic line interpolation

由 A 和 C 两点线性插值来得到 R 点的压力 H_R 和流量 Q_R,如式(4)所示。

$$H_R = (H_A + kH_C)/C_0,$$
$$Q_R = (Q_A + kQ_C)/C_0 \tag{4}$$

将 $A_1 = H_R + BQ_R$，$A_2 = B + R/C_0|Q_R|$，$D_1 = H_B - BC_0Q_B$，$D_2 = BC_0 + R|Q_B|$，代入式(3)，可得

$$C^+: H_P = A_1 - A_2Q_P,$$
$$C^-: H_P = D_1 + D_2Q_P \tag{5}$$

联立求解式(5)中 C^+ 和 C^-，可得到无泄漏管道实时的压力和流量，计算式为

$$Q_P = \frac{A_1 - D_1}{A_2 + D_2},$$
$$H_P = \frac{(A_1 + D_1 + D_2 - A_2)}{2}Q_P \tag{6}$$

1.4　边界条件

1.4.1　上游边界条件

保持上游水位恒定，即 H 为定值，假设 $H = H_0$，代入负特征线方程中可得上游节点处的流量为

$$Q_P = \frac{H_0 - D_1}{D_2} \tag{7}$$

1.4.2　泄漏孔处边界条件

假设泄漏孔外为大气压，泄漏孔处的泄漏流量为 Q_L，泄漏孔上游流量为 Q_L^+，泄漏孔下游流量为 Q_L^-，泄漏孔处的泄漏系数为 C_g，泄漏孔处边界条件的示意图如图 4 所示。

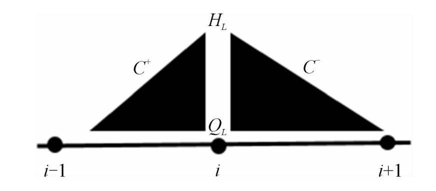


图 4　泄漏孔处的边界条件

Fig. 4　Boundary conditions at leakage holes

根据质量守恒定律，可得

$$Q_L^+ = Q_L^- + Q_L \tag{8}$$

假定泄漏孔处流体的出流方式为小孔出流，则可求得泄漏孔处的泄漏流量 Q_L 为

$$Q_L = C_g\sqrt{2gH_L} \tag{9}$$

联立正、负特征线方程可计算出泄漏点处压力及上、下游流量的表达式为

$$H_L = \frac{D_2A_1 + A_2D_1 - A_2D_2D_L}{D_2 + A_2},$$
$$Q_L^+ = \frac{A_1 - H_L}{A_2}, Q_L^- = \frac{H_L - D_1}{D_2} \tag{10}$$

1.4.3　下游阀门处边界条件

假定阀门处为孔口出流形式，阀门处的流量计算表达式为

$$Q_{PN} = -\frac{A_2(Q_R\tau)^2}{2H_R} + \sqrt{\left[\frac{A_2(Q_R\tau)^2}{2H_R}\right]^2 + \frac{A_1(Q_R\tau)^2}{H_R}} \tag{11}$$

其中：H_R 为定常流动时阀门全开时阀门处的压力；Q_R 为定常流动时阀门全开时阀门处的流量；τ 为阀门相对开度。

把式(10)代入正特征线方程中，得到阀门末端的压力为

$$H_{PN} = A_1 - A_2Q_{PN} \tag{12}$$

1.4.4　分叉管处的边界条件

分叉管处的节点示意图，如图 5 所示。

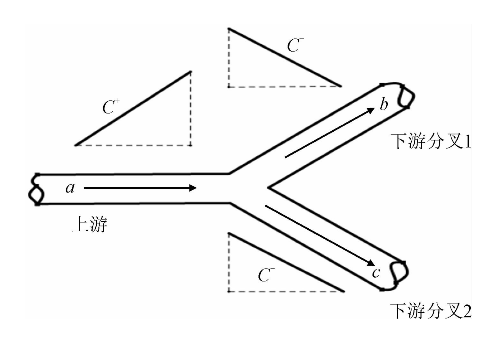


图 5　分叉点处节点示意图

Fig. 5　Schematic diagram of nodes at bifurcation points

忽略分叉管连接处的能量损失，假设该处有相同的水头，上游直管采用 C^+ 特征线相容方程，下游两分叉管均采用 C^- 特征线相容方程，得到分叉管节点的压力为

$$Ha_i^j = Hb_i^j = Hc_i^j = \frac{\frac{Aa_1}{Aa_2} + \frac{Db_1}{Db_2} + \frac{Dc_1}{Dc_2}}{\frac{1}{Aa_2} + \frac{1}{Db_2} + \frac{1}{Dc_2}} \tag{13}$$

然后再将压力 H 代入到各个相容性方程，反推可得到各个管道节点处的流量 Q。

2　模型验证

目前，关于分叉型输水管道泄漏的实验数据较少，但分叉管的控制方程与直管控制方程相同，区别仅在于连接点处的流量变化。因此，本研究将直管泄漏数值计算数据与郭新蕾等[32]的实验数据进行了对比，结果如图 6(a)所示。同时，为了进一步提高数值模型的可靠性，将 Flowmaster 软件模拟结果



与模型计算结果进行了对比，如图6(b)所示。

实验模型的基本参数为：初始流量 $Q_L=10\%Q_0$；非恒定摩阻系数为0.014；泄漏位置 $X_L=750$ m；其他参数均保持不变。

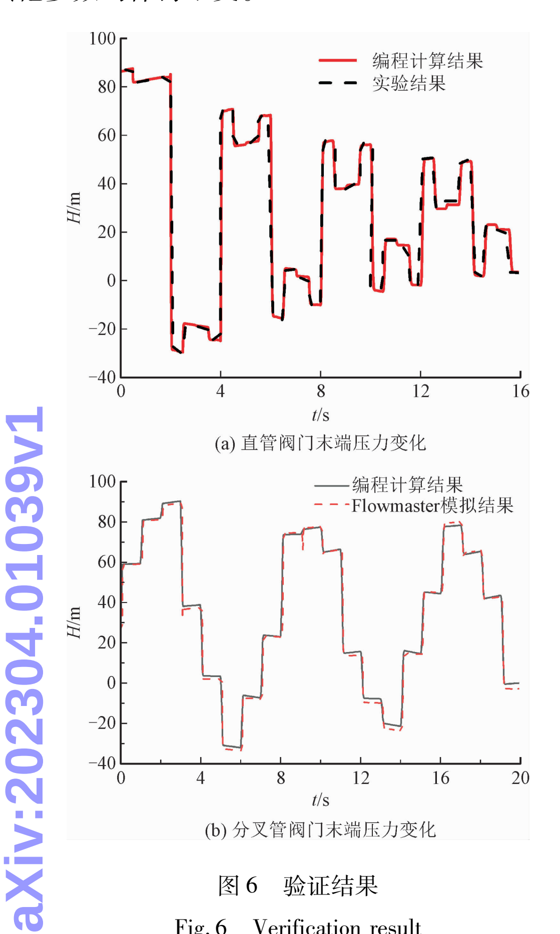


图6　验证结果

Fig. 6　Verification result

由图6可以看出，模型计算结果与实验结果符合较好，压力衰减趋势及变化规律保持较高的一致性。两者之间的平均误差约为7%，最大误差约为8.4%，主要发生在压力峰值处，这是由于不同模型计算处理过程中存在差异，但误差均在允许的范围之内。

3　计算结果与分析

3.1　分叉管长度的影响

本研究分析了3种不同长度分叉管对泄漏时管内瞬变流特性的影响，长度分别为250、500、1 000 m，泄漏量为 Q_0 的1%，泄漏位置位于距上游水库500 m处，保持其他参数不变。计算得到了不同分叉管长度下阀门处压力的变化曲线，如图7所示。

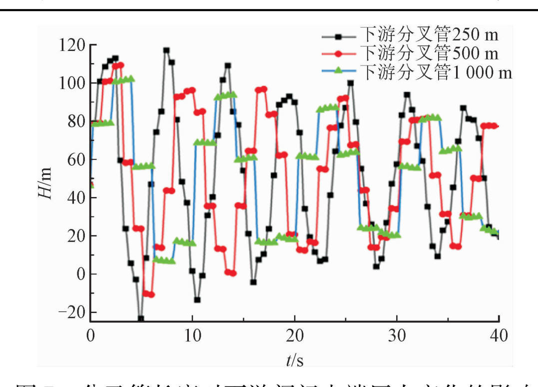


图7　分叉管长度对下游阀门末端压力变化的影响

Fig. 7　Pressure changes at the end of downstream valves with bifurcation length

由图7可知，分叉管长度增加2倍时，压力峰值并没有出现完全线性变化，第一个周期处的压力峰值大小分别为114.86、110.97、104.78 m，数值相差越来越大，周期也随着分叉管长度的增加而变长。随着分叉管长度的增加，压力峰值逐渐降低，并且趋于平缓，衰减速率逐渐减小，但压力曲线的变化趋势基本一致，因此可知不同分叉管长度对阀门末端压力峰值的影响较大。

3.2　阀门关闭时间的影响

研究了不同阀门关闭时间对阀门末端压力变化规律的影响，下游分叉管长度为500 m，保持其他参数不变，阀门的关闭时间为0.5、2、5 s，关闭方式采取线性关闭的方式，阀门末端压力变化曲线如图8所示。

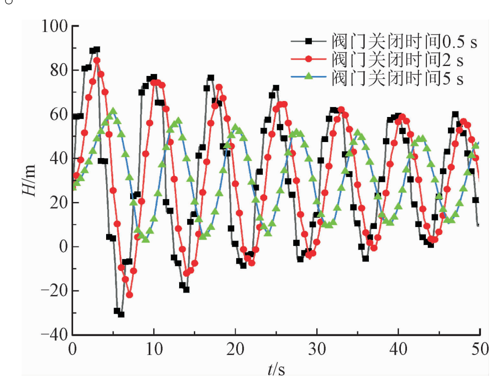


图8　阀门关闭时间对分叉管末端压力变化的影响

Fig. 8　The effect of valve closing time on the pressure change at the end of the bifurcated pipe

由图8可知，随着阀门关闭时间的增加，压力曲线峰值逐渐减小，尖点逐渐变圆滑，周期越长，压力曲线差别越大，衰减速率也越慢；当阀门关闭时间为0.5、2 s时，达到水击峰值的时间为3 s，周期分别为7.1、8.0 s，关闭时间为5 s时，达到峰值的时间为5 s，

周期为 8.5 s,该工况下所产生的水击都是直接水击,各压力峰值间的最大差值为 25.23 m,并且差值随时间而逐渐减小,说明阀门关闭时间对分叉管末端压力变化的影响较大。

3.3　泄漏位置的影响

为了探究不同泄漏位置对分叉管阀门末端压力的影响,取下游分叉管的长度 $L_1 = L_2 = 500$ m、泄漏量为 Q_0的 10%,保持其他参数不变,数值模拟了快速关闭阀门和缓慢关闭阀门两种方式下管道的泄漏过程。

3.3.1　快速关闭阀门时泄漏位置的影响

采取线性快速关闭阀门的方式,阀门的关闭时间为 0.5 s,对不同的泄漏位置进行数值模拟。泄漏位置分别位于直管段距上游水库 200、400、600、800 m 处,数值模拟了下游分叉管压力变化曲线,如图 9 所示。

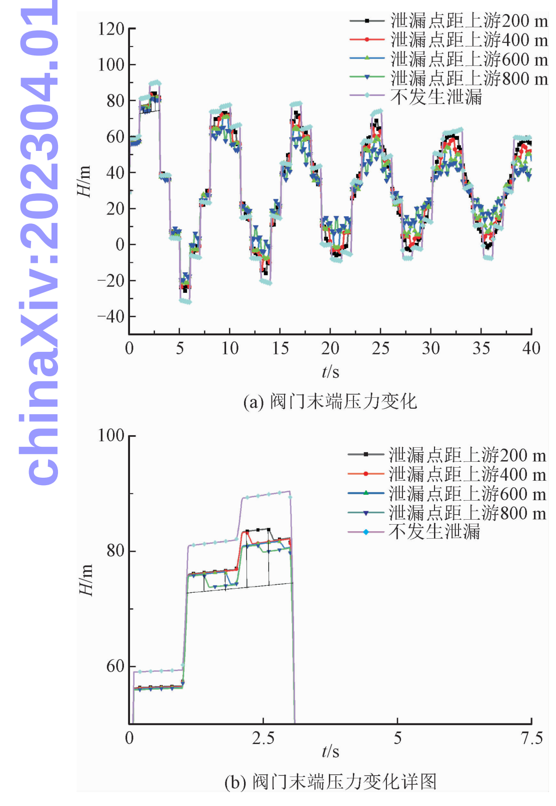


图 9　不同泄漏位置对阀门末端压力的影响

Fig. 9　The influence of different leakage position on the pressure at the end of the valve

由图 9 (a)可以看出,在不发生泄漏时,阀门末端的水击压力峰值最大,随着泄漏的发生,泄漏位置距离上游越远,阀门末端的水击压力峰值越小,但在第一相稳定区域,不同的泄漏位置的压力峰值大致相同。由图 9(b)可以得到,在距离上游水库小于 600 m 位置处泄漏时,水击压力曲线呈现凸状,当距离上游水库大于 800 m 处发生泄漏时,压力曲线呈现凹状。因此,可以根据压力曲线呈现的凸凹状,大致判断泄漏所发生的位置,减少泄漏检测的工作量,为进一步的精准检测定位奠定了基础。

3.3.2　缓慢关闭阀门时泄漏位置的影响

采取线性缓慢关闭阀门的方式,阀门关闭时间为 4 s,对不同泄漏位置进行数值模拟。泄漏位置位于直管段距离上游水库 100、200、300、400、500、600、700、800、900 m 处,数值模拟了阀门末端压力变化曲线如图 10 所示。

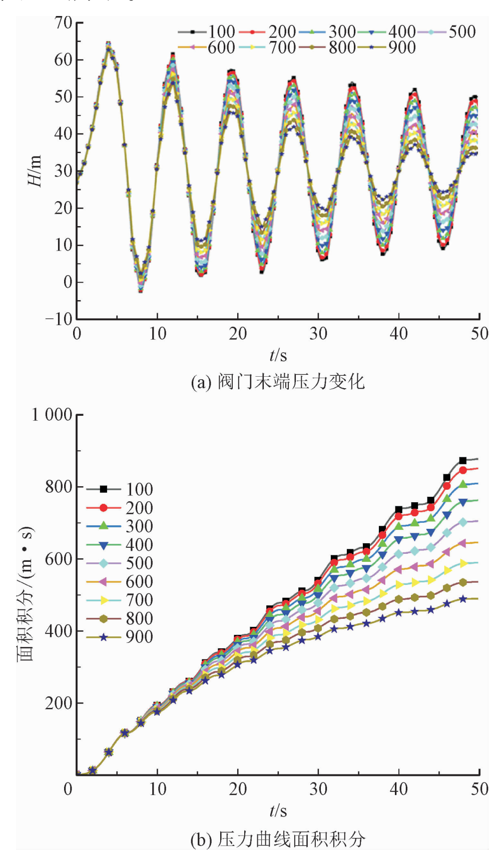


图 10　不同泄漏位置对阀门末端压力的影响

Fig. 10　The influence of different leakage position on the pressure at the end of the valve

由图 10(a)可知,水击波压力峰值在第一相4 s 时达到最大,随着泄漏位置距离上游水库越来越远,所产生的水击压强峰值越小,压力尖点处也变的越来越平滑,水击波衰减速率也渐渐放缓。压力变化曲线横、纵坐标所围成的面积可以得到压力曲线面积积分,由图 10(b)可知,泄漏位置越靠近上游,所产生的压力曲线面积积分越大,在距离上游水库 100 m 时,达到最大压力曲线面积积分为 877.943 m · s,当

泄漏位置距离上游水库 900 m 时，达到最小压力曲线面积积分为 536.38 m·s，并且随着时间的推移，各线间的面积积分差值逐渐增大。因此，当管道发生泄漏时，可以通过压力曲线的面积积分来判断泄漏所发生的位置。

3.4 泄漏量的影响

为了探究不同泄漏量对分叉管阀门末端压力的影响，取下游分叉管道的长度 $L_1 = L_2 = 500$ m、泄漏位置距离上游水库 500 m 处，保持其他参数条件不变，数值模拟了快速关闭阀门和缓慢关闭阀门两种方式下管道的泄漏过程。

3.4.1 快速关闭阀门时泄漏量的影响

采取线性快速关闭阀门的方式，阀门的关闭时间为 0.5 s，对不同的泄漏量进行数值模拟，泄漏量分别取为 0、0.1% Q_0、1% Q_0、10% Q_0、20% Q_0，得到了下游分叉管压力变化曲线如图 11 所示。

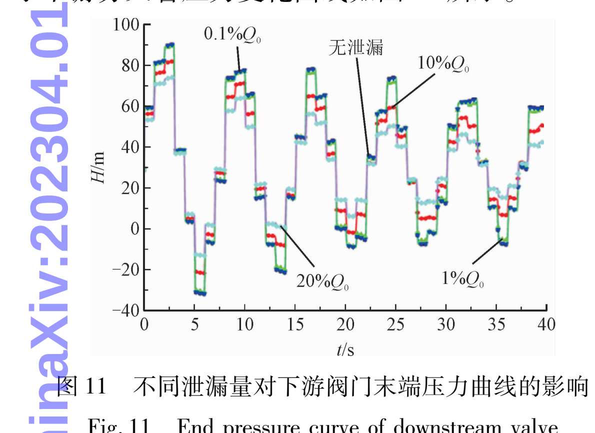


图 11 不同泄漏量对下游阀门末端压力曲线的影响

Fig. 11 End pressure curve of downstream valve with different leakage

由图 11 可知，随着泄漏量的增大，各个泄漏量之间压力峰值的差值就越大，在第 3 个周期处达到的最大差值为 24.91 m，并且随着时间的推移，衰减速率在逐渐变慢，当泄漏量为 0、0.1% Q_0、1% Q_0时，由于泄漏量较小，因此压力曲线的变化并不明显，最大压力峰值差值只有 3.42 m，但当泄漏量为 10% Q_0、20% Q_0时压力曲线变化差异十分明显，但不同的泄漏量所表现出的衰减趋势较为一致，因此，在较小泄漏量下并不能察觉出压力变化的明显差异。

3.4.2 缓慢关闭阀门时泄漏量的影响

采取线性缓慢关闭阀门的方式，阀门的关闭时间为 4 s，泄漏量分别取为 0、0.1% Q_0、0.5% Q_0、1% Q_0、5% Q_0、10% Q_0、15% Q_0、20% Q_0，数值模拟了下游分叉管压力变化曲线，如图 12 所示。

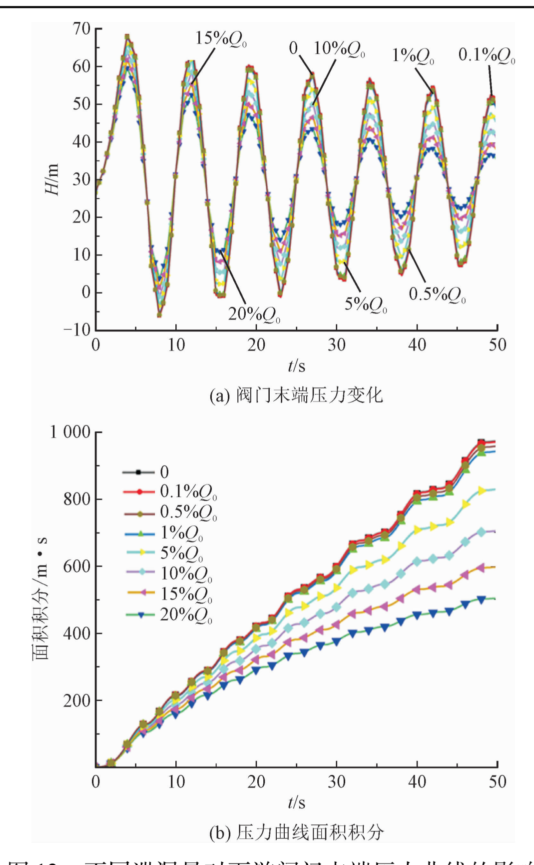


图 12 不同泄漏量对下游阀门末端压力曲线的影响

Fig. 12 Pressure curve of downstream valve end with different leakage

由图 12(a)可知，当泄漏量为 0、0.1% Q_0、0.5% Q_0时，阀门末端压力信号变化差异不大，但随着泄漏量的增大，阀门末端压力峰值在逐渐减小，衰减速率逐渐变慢，在 4 s 时不同泄漏量的水击压力峰值达到最大，最大值为 68.35 m，各线间压力峰值的差值随时间逐渐增大，4 s 时差值最小为 8.50 m；由图 12(b)可知，随着泄漏量逐渐增大，阀门末端压力曲线面积积分在逐渐减小，并且面积积分的增长速率逐渐减小。当泄漏量为 0.1% Q_0时，达到最大压力曲线面积积分为 973.81 m·s，当泄漏量为 20% Q_0时，达到最小压力曲线面积积分为 504.094 m·s，并且随着时间的增长，各个泄漏量之间压力曲线面积积分差值越来越大。

4 结 论

在复杂地形的输水系统中，分叉结构输水管道泄漏瞬变特性引起了大量学者的关注。本研究构建了分叉结构输水管道泄漏数学模型，并验证了模型的正确性，所得结果如下。

1)不同分叉管长度对阀门末端压力峰值的影响较大,分叉管长度越长,阀门末端的压力峰值越小,并且在幅值处的变化越为平缓,衰减速率也逐渐变慢。

2)压力曲线的差异随阀门关闭时间增加而增大,尖点处压力峰值更为平滑,峰值越低,在 2 s 阀门关闭时间内,压力曲线周期的变化并不明显。

3)随着泄漏量增大,阀门末端的压力峰值越小,在小于 1% Q_0 的泄漏量下并不会引起压力信号的明显变化,但不同的泄漏量所引起的压力变化在趋势上较为一致。

4)管道的泄漏位置对水击有较大影响,泄漏位置越靠近上游,水击压力峰值越大,并且压力曲线在幅值处会出现凸起趋势,但当泄漏位置在管道下半段时,压力曲线在幅值处会出现凹陷趋势,因此可以根据压力曲线变化趋势判断泄漏所发生的位置。

分叉结构输水管道泄漏瞬变流特性的系统研究,有效的改进了管道泄漏检测方法,提高了泄漏位置的精度,为保障输水管道的安全稳定运行提供了有一定的理论支撑。

参考文献:

[1] 张帅,刘文清,张玉钧,等. 基于激光吸收光谱技术天然气管道泄漏定量遥测方法的研究[J]. 物理学报,2012,61(5):84-91.
ZHANG Shuai, LIU Wenqing, ZHANG Yujun, et al. Research of quantitative remote sensing of natural gas pipeline leakage based on laser absorption spectroscopy[J]. Acta physica Sinica, 2012, 61(5):84-91(in Chinese).

[2] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报,2016,47(3):424-435.
YANG Kailin. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion[J]. Journal of hydraulic engineering,2016,47(3):424-435(in Chinese).

[3] 李萍,丁珏,翁培奋. 气液两相流泄漏扩散的数值模拟[J]. 应用力学学报,2006,23(2):182-186.
LI Ping, DING Jue, WENG Peifen. Numerical simulation to leakage dispersion process in Two-Phase jet[J]. Chinese journal of applied mechanics,2006,23(2):182-186(in Chinese).

[4] 陈玉涛,瞿叶高,周劭翀,等. 管系内一维可压缩流动数值建模与特性分析[J]. 应用力学学报,2021,38(1):11-17.
CHEN Yutao, QU Yegao, ZHOU Shaochong, et al. Numerical modeling and analysis of one-dimensional compressible flow in pipeline[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(1):11-17(in Chinese).

[5] 周知进,刘爱军,何星,等. 基于流体冲击对管道转弯处作用力影响分析[J]. 应用力学学报,2019,36(3):674-678.
ZHOU Zhijin, LIU Aijun, HE Xing, et al. Analysis of the influence of fluid impact on the force acting on the bend of pipe[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(3):674-678(in Chinese).

[6] 蒋明,陈明. 求解管道耦合水力瞬变模型的 Godunov 格式[J]. 应用力学学报,2013,30(3):406-411.
JIANG Ming, CHEN Ming. Godunov scheme for solving coupling hydraulic transient model of the pipeline[J]. Chinese journal of applied mechanics,2013,30(3):406-411(in Chinese).

[7] 赵卓,赵晓锋,万建信,等. 基于特征线法的长距离加压输水系统的水锤防护研究[J]. 给水排水,2019,55(增1):277-280.
ZHAO Zhuo, ZHAO Xiaofeng, WAN Jianxin, et al. Study on water hammer protection of long distance pressurized water conveyance system based on characteristic line method[J]. Water & wastewater engineering,2019,55(S1):277-280(in Chinese).

[8] 陈兵,徐源,白世星. 管输超临界 CO_2 泄漏过程管内瞬变特性研究[J]. 石油机械,2020,48(8):136-142.
CHEN Bing, XU Yuan, BAI Shixing. Study on transient flow characteristics in pipeline supercritical CO_2 leakage[J]. China petroleum machinery,2020,48(8):136-142(in Chinese).

[9] 白莉,岳前进,李洪升. 基于水力瞬变与扩展卡尔曼滤波的管道流体监测与泄漏定位[J]. 计算力学学报,2005,22(6):739-744.
BAI Li, YUE Qianjin, LI Hongsheng. Pipeline fluid monitoring and leak location based on hydraulic transient and extended Kalman filter[J]. Chinese journal of computational mechanics,2005,22(6):739-744(in Chinese).

[10] 蔡正敏,彭飞,易发新,等. 长输管道泄漏故障诊断方法的研究[J]. 应用力学学报,2002,19(2):38-43.
CAI Zhengmin, PENG Fei, YI Faxin, et al. Research on the fault diagnosis method for the leakage detection of pipelines[J]. Chinese journal of applied mechanics,2002,19(2):38-43(in Chinese).

[11] 郭新蕾,杨开林. 管道泄漏检测的水力瞬变全频域数学模型[J]. 水利学报,2008,39(10):1264-1271.
GUO Xinlei, YANG Kailin. Hydraulic transient model in frequency domain for leak detection in pipeline systems[J]. Journal of hydraulic engineering,2008,39(10):1264-1271(in Chinese).

[12] 杨开林,郭新蕾. 管道系统泄漏检测的全频域法[J]. 水利水电科技进展,2008,28(3):40-44.
YANG Kailin, GUO Xinlei. Pure frequency domain method for pipeline leakage detection in water diversion projects[J]. Advances in science and technology of water resources,2008,28(3):40-44(in Chinese).

[13] 郭新蕾,杨开林. 基于瞬变流和遗传算法的管道泄漏辨识[J]. 计算力学学报,2009,26(5):664-669.
GUO Xinlei, YANG Kailin. Leak detection in pipelines based on hydraulic transient and genetic algorithm analysis[J]. Chinese journal of computational mechanics,2009,26(5):664-669(in Chinese).

[14] 郭新蕾,杨开林,郭永鑫,等.管道系统泄漏检测的瞬变水击压力波法[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(1):20-28.
GUO Xinlei,YANG Kailin,GUO Yongxin,et al. Transient pressure rise method for leak detection in pipeline systems[J]. Journal of basic science and engineering,2011,19(1):20-28(in Chinese).

[15] 杨镇榜,徐宽.基于瞬变流的输油管道泄漏检测模拟[J].当代化工,2017,46(3):517-519.
YANG Zhenbang, XU Kuan. Simulation of leak detection of oil pipeline by transient flow method[J]. Contemporary chemical industry,2017,46(3):517-519(in Chinese).

[16] 李毅佳,刘瀚和,马斌.基于瞬变模型仿真的长输水管道泄漏检测方法研究[J].中国给水排水,2015,31(1):65-68.
LI Yijia, LIU Hanhe, MA Bin. Study on leak detection method of long-distance water transmission pipeline based on transient model simulation[J]. China water & wastewater,2015,31(1):65-68(in Chinese).

[17] 陈潜,邢晓凯,王炜硕.基于特征线法的输气管道泄漏瞬态仿真与分析[J].科学技术与工程,2017,17(30):217-222.
CHEN Qian,XING Xiaokai,WANG Weishuo. Transient simulation and analysis of gas pipeline leakage based on characteristics method[J]. Science technology and engineering,2017,17(30):217-222(in Chinese).

[18] 郑杰,吴荔清,刘润华,等.输油管道泄漏检测信号的统计处理方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2001,25(3):84-85.
ZHENG Jie,WU Liqing,LIU Runhua,et al. A statistic processing method for automatic detection of signal of pipe laying leakage[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science),2001,25(3):84-85(in Chinese).

[19] 郑杰,吴荔清,刘润华,等.输油管道泄漏自动检测装置的研制[J].遥测遥控,2001,22(3):44-46.
ZHENG Jie,WU Liqing,LIU Runhua,et al. Development of pipeline leakage test equipment[J]. Journal of telemetry tracking and command,2001,22(3):44-46(in Chinese).

[20] 康宪芝,李健,张宇,等.基于瞬变流法的管道泄漏定位研究[J].计算机工程与应用,2015,51(19):255-259.
KANG Xianzhi,LI Jian,ZHANG Yu,et al. Research on pipeline leak location based on transient flow method[J]. Computer engineering and applications,2015,51(19):255-259(in Chinese).

[21] 孙良,王建林.基于泄漏瞬变模型的管道泄漏检测与定位方法[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(1):159-168.
SUN Liang,WANG Jianlin. Release transient modeling based leak detection and location method for pipelines[J]. Journal of basic science and engineering,2012,20(1):159-168(in Chinese).

[22] 胡婧.基于水力瞬变流理论的给水管网漏失实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

[23] DUAN H F,PAN B,WANG M L,et al. State-of-the-art review on the transient flow modeling and utilization for urban water supply system (UWSS) management[J]. Journal of water supply: Research and technology-aqua,2020,69(8):858-893.

[24] 吴猛猛,董秀臣,薛顺艳.基于瞬变流法的舰船管路阀门泄漏检测研究[J].机床与液压,2020,48(6):56-60.
WU Mengmeng,DONG Xiuchen,XUE Shunyan. Research on leakage detection of warship pipe valves based on transient flow method[J]. Machine tool & hydraulics,2020,48(6):56-60(in Chinese).

[25] HE G X,LIANG Y T,LI Y S,et al. A method for simulating the entire leaking process and calculating the liquid leakage volume of a damaged pressurized pipeline[J]. Journal of hazardous materials,2017,332:19-32.

[26] CHEN Q,XING X K,JIN C,et al. A novel method for transient leakage flow rate calculation of gas transmission pipelines[J]. Journal of natural gas science and engineering,2020,77:103261.

[27] WANG X,LIN J R,GHIDAOUI M S. Usage and effect of multiple transient tests for pipeline leak detection[J]. Journal of water resources planning and management,2020,146(11):06020011.

[28] 俞逸飞,李健.瞬变流衰减法管道泄漏检测的适用性[J].纳米技术与精密工程,2018,1(1):73-78.
YU Yifei,LI Jian. Applicability of pipe leak detection method using transient damping[J]. Nanotechnology and precision engineering,2018,1(1):73-78(in Chinese).

[29] LEE P J,VÍTKOVSKY J P,LAMBERT M F,et al. Leak detection in pipelines using an inverse resonance method[C]//Conference on Water Resources Planning and Management. [S. l.]:American Society of Civil Engineers,2002:1-8.

[30] LEE P J,VÍTKOVSKY J P,LAMBERT M F,et al. Frequency response coding for the location of leaks in single pipeline systems[C]//Pumps,Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management. [S. l.]:The Netherlands Press,2003:371-378.

[31] LEE P J,VÍTKOVSKY J P,LAMBERT M F,et al. Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: A numerical study[J]. Journal of sound and vibration,2005,284(3/5):1051-1073.

[32] 郭新蕾,杨开林,郭永鑫,等.管道泄漏检测全频域法试验验证及抗噪性研究[J].水利学报,2011,42(6):713-720.
GUO Xinlei,YANG Kailin,GUO Yongxin,et al. Experimental validation of pure frequency method for detecting pipeline leaks and its anti-noise property[J]. Journal of hydraulic engineering,2011,42(6):713-720(in Chinese).

（编辑 史淑英）